

火山性深部低周波地震に見られる特徴的地震波形： 数値モデリングに基づく生成機構の検討*

弘前大学大学院理工学研究科 春山太一・小菅正裕・前田拓人

1. はじめに

地震の中には、その波形の卓越周波数が地震の規模から期待される周波数に比して顕著に低いものがある。それらは低周波地震と呼ばれ通常の地震から区別されている。低周波地震の発生場所は、(1) 火山近傍浅部、(2) 火山近傍の下部地殻から最上部マントルまでの深部、(3) 火山からやや離れた深部、(4) 西南日本プレート境界の深さ 30 km 前後である。本論文では、(2) の地震を火山性深部低周波地震と呼ぶことにする。火山性深部低周波は脆性-塑性境界よりも深部で発生することから、断層運動とは異なるメカニズムで発生すると考えられている。そのメカニズムとして、火山性流体が励起過程に関与していることが示唆されている（例えば、Ukawa and Otake., 1987; Hasegawa et al., 2005）。実際に、箱根火山の水蒸気爆発や霧島火山の噴火の前に火山性深部低周波地震が活発化したことが報告されている（Yukutake et al., 2019; Kurihara et al., 2019）ことから、火山性深部低周波地震の生成メカニズムを明らかにすることは、火山活動の把握や火山性流体の特性の解明においても重要である。

しかし、火山性深部低周波地震は、同じ地域でも地震ごとに波形が異なる場合が多く、多様な波形を統一的に説明できる発生メカニズムはいまだ明らかになっていない。メカニズム解説を目指したモーメントテンソル解析（例えば、Oikawa et al., 2019）では初動部分の波形を説明することを試みているが、火山性深部低周波地震の波形において特徴的な、長い振動継続時間は充分に説明することができない。継続時間が長い波形の中には、図 1 のように、特定の周波数が卓越する特異な波形を示すものがある。このような波形は波動の共鳴として数値モデリングが可能と考えられる。そこで、本研究では地震波動伝播シミュレーションによって波形を計算し、火山性深部低周波地震の特徴的な波形をもたらす構造と力源を明らかにすることを目的とする。

2. 火山性深部低周波地震の特徴的な地震波形の性質

小菅・春山（2018）は特異な波形をもつ地震の空間分布を調べ、北海道の雌阿寒岳や福島の吾妻山、栃木県の高原山などで発生していることを確認した。代表例として、山形県肘折で観測された波形とスペクトル、および振動極性の時間別空間分布を図 1 に示す。地震波形は継続時間が長く紡錘型である。スペクトルには最も卓越したピークの他にも間欠的なピークが見られ、倍音が現れているものと考えられる。振動極性は主に一方向の振動が卓越し、時間変化は顕著でなかった。上記の地域でも同様な特徴が確認できた。本研究では以上の特徴、すなわち、

*Seismic waveform modeling of deep low-frequency earthquake in volcanic regions by Taichi Haruyama et al.

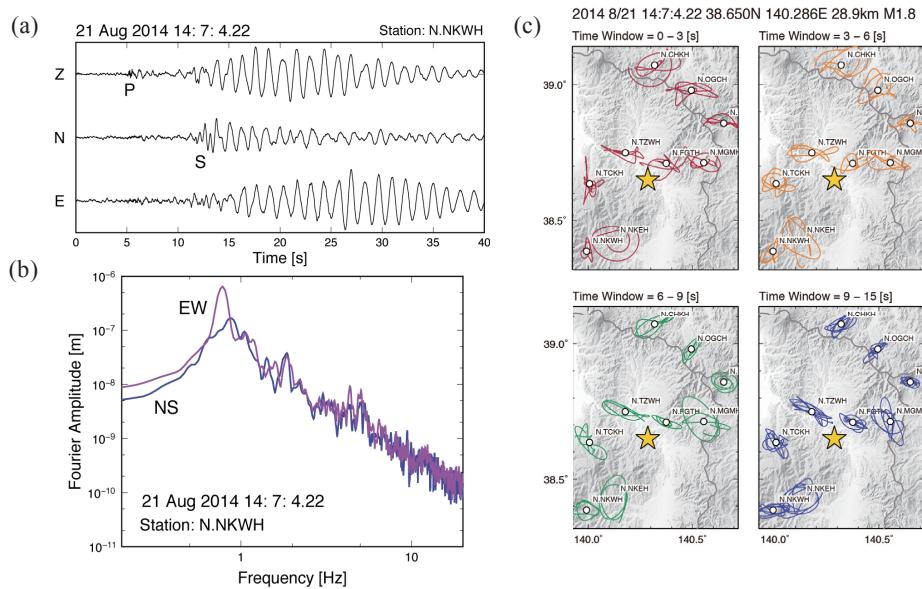


図 1. 2014 年 8 月 21 日に山形県肘折で発生した火山性深部低周波地震。(a) に 3 成分波形 (Z は上下動成分, N は南北動成分, E は東西成分) を示す。(b) は横軸に周波数, 縦軸に速度振幅スペクトルを示す。青色で南北成分, 紫色で東西成分を示す。(c) に振動極性の時間別空間を示す。それぞれ S 波の到達時刻からの時間を表し, 赤線は 0-3 s, 黄線は 3-6 s, 緑線は 6-9 s, 青線は 9-15 s の時間範囲を示す。

低周波で継続時間が長く概形が紡錘型を示すこと, スペクトルに倍音が現れること, 及び振動極性が一方向に卓越することを説明できるような震源の力学的特性および地下構造の推定を試みた。

3. 波動伝播シミュレーションの概要

本研究では, 共鳴体として震源の周辺に地震波低速度領域を置き, 力源, 震源位置, 低速度領域のパラメータを変えて地震波形を計算した(図 2)。計算には, 3 次元波動伝播シミュレーションコード OpenSWPC (Maeda et al., 2017) を用いた。力源は, 鉛直方向または水平方向を向くシングルフォース, 断層面が水平または鉛直方向のダブルカップルの 4 種類を用いた。低速度領域は柔らかい弾性体を想定し, P 波, S 波速度を $V_p=1.5 \text{ km/s}$, $V_s=1.0 \text{ km/s}$ とした。低速度領域以外の地震波速度は JMA2001 (上野・他, 2002) を用いた。低速度領域の位置は深さ 30 km に固定し, 形状は円柱, クラック状, 球形, 箱型の 4 種類を用いた。力源の震源時間関数はベル型の形状を持つ 1 サイクルの Küpper wavelet (Maeda et al., 2017) とした。差分法の計算では, 面積 41.4 km^2 , 深さ 35 km の領域を 0.05 km 間隔のグリッドで離散化した。時間ステップは 0.003 s 間隔として 24 s 間の地震波計を計算した。観測点は地表に水平 5 km 間隔で置いた。得られた地震波形をもとに, 地震波形, スペクトル, 振動極性などの特徴を観測した。

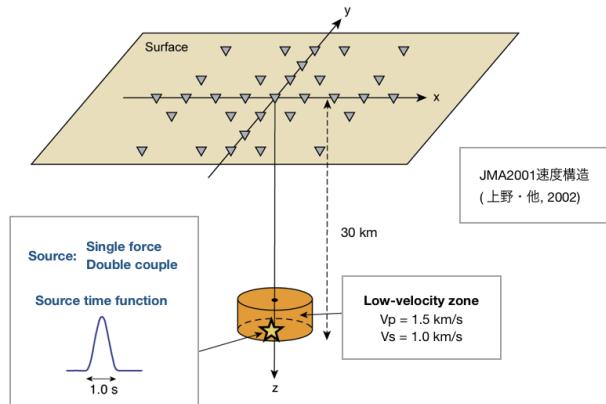


図2. 波動伝播シミュレーションに用いたモデルの概念図。逆三角形が観測点、星印が震源、橙色の円柱が低速度領域を表している。

4. 波動伝播シミュレーション結果

(1) 低速度領域と力源位置

低速度領域の有無による波形と地震波動場のスナップショットの比較を図3に示した。力源は水平方向のシングルフォースとし、箱型の低速度領域の中心に与えた。低速度領域が無い場合の波形はパルス波となるのに対し、力源が低速度領域の中にある場合は、低速度領域内で振動が共鳴し、継続時間の長い波形が観測された。ただし、低速度領域の大きさは一辺200 m以上が必要である。また、力源が低速度領域から離れるに伴い、S波の振幅および継続時間が減少した。これらの結果は、力源の種類および低速度領域の形状には依存しない。以上のことから、観測された火山性深部低周波地震の長い継続時間を再現するためには、ある一定以上の大きさを持つ低速度領域内に力源が位置する必要があることがわかった。しかし、力源パルスを一つ与えた場合では、S波の初動部分で最大の振幅となり、観測された紡錘型の波形は再現できなかった。

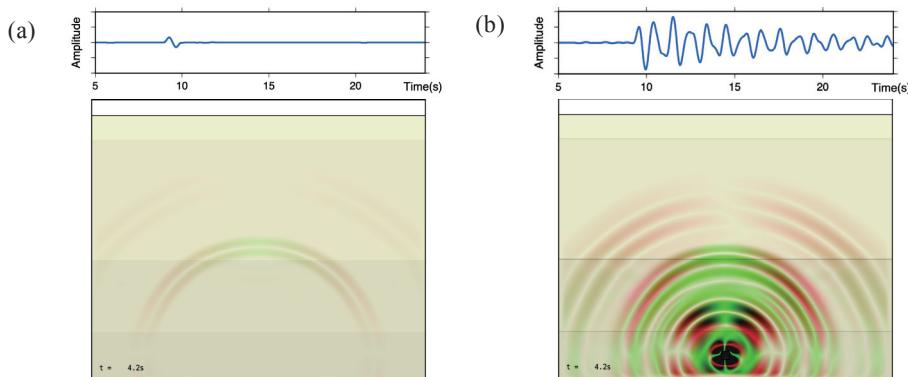


図3. 低速度領域を与えない場合(a)と与えた場合(b)の波形とスナップショット。力源は震源時間関数1.0 s のシングルフォースで、深さ30 kmにおいて鉛直断面に平行に水平方向に作用させた。上段は断面に平行な成分の波形で、下段は破壊開始から4.2 s 後のスナップショットを示す。赤色は上下動成分、緑色は水平動成分をそれぞれ表す。

(2) 複数パルス力源

そこで、複数の力源パルスについて検討した。力源は同じ場所で4回繰り返すものとし、そのパルスの時間間隔を0.1–1.5 sまでの範囲で等間隔に与えた。その結果、力源位置に前のパルスによる波動が戻ってくるタイミングで次のパルスが作用したとき、振幅が増幅し、紡錘型の波形が再現できることがわかった。例として、複数パルスを与えたときの波形を図4に、スナップショットを図5に示す。この場合の力源は水平方向のシングルフォースで、体積1 km³の箱形の低速度領域内の中心に与えた。このとき、力源位置に前のパルスが戻ってくる時間は1 s後であるため、パルス時間間隔を1 sで与えた場合には低速度領域内で基本モードが卓越し、紡錘型の波形が再現できた。一方、パルス時間間隔を0.7 sで与えた場合は、低速度領域内で高次モードが卓越し、紡錘型の波形が再現できなかった。同様なことはすべての力源のタイプで確認できた。なお、最大振幅の出現時刻は与えるパルスの個数により変化した。以上のことから、紡錘型の波形は、力源パルスの時間間隔と低速度領域の大きさが特別な条件を満たす場合に出現するということが言える。多くの場合にはこのような条件が満たされないために、多様な波形が出現することが考えられる。

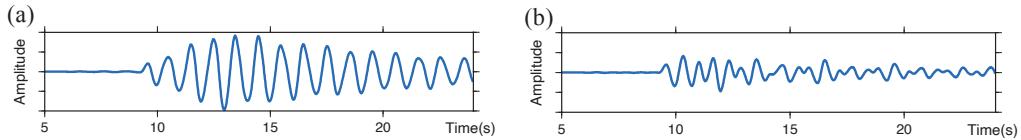


図4. 力源パルスの時間間隔が(a)1.0 sと(b)0.7 sの時の水平成分の波形。

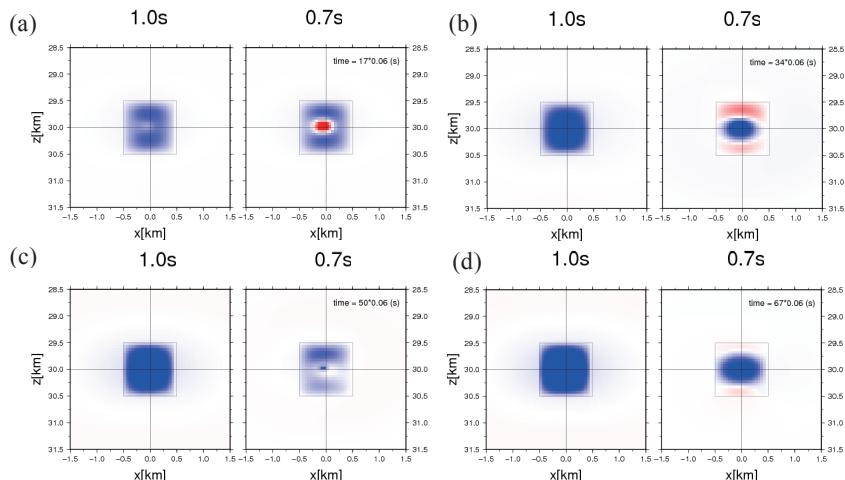


図5. 鉛直断面における振幅分布。破壊開始から(a)約1 s後、(b)約2 s後、(c)3 s後、(d)約4 s後のスナップショットをそれぞれ示す。(a)–(d)それぞれの左側はパルス時間間隔が1.0 s、右側は0.7 sの場合を示す。赤色は水平方向の振幅が正、青色は負であることを表す。

(3) スペクトル

紡錘型の波形が再現できた場合と、再現できなかった場合のスペクトルを図6に示す。紡錘型が再現できたスペクトルは、卓越するピークと倍音を示す間欠的なピークが現れ、観測スペクトルと調和的である。一方、紡錘型が再現できなかったスペクトルでは、ピークの卓越と倍音の出現は明瞭ではなかった。

(4) 振動極性

紡錘型の波形が再現できた場合の振動極性を図7に示す。力源はシングルフォースとダブルカップルで、力または断層の向きを変えた場合も示している。シングルフォースの振動極性は、水平方向の力源では与えた方向と平行な振動、鉛直方向の力源の場合はラディアル成分が卓越した。ダブルカップルでの振動極性は、水平断層ではそれの方向と平行な振動が卓越し、鉛直な横ずれ断層では、節面上の観測点ではトランスマーブス成分が、P軸およびT軸方向の観測点ではラディアル成分が卓越した。

観測波形の振動極性は、一方向の振動が卓越し、時間変化は顕著ではない(図1)。この特徴は、シミュレーションにおいては、水平方向のシングルフォースを与えた場合と水平な断層を与えた場合に近いが、観測極性はより複雑である。それは共鳴体の形状が本研究で仮定したものよりも複雑であることに起因する可能性がある。

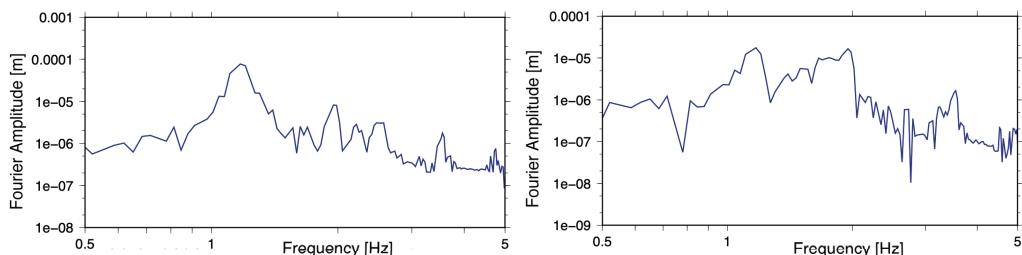


図6. 力源パルスの時間間隔が(a)1.0 s と(b)0.7 s の時のスペクトル。

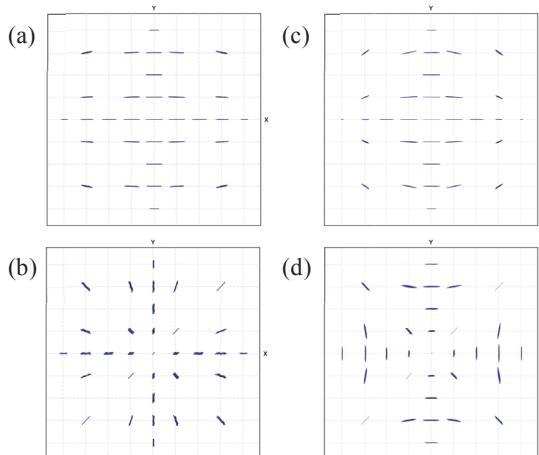


図7. 複数のパルスを与えた場合の地表面における振動極性分布。(a)水平方向のシングルフォースの場合、(b)鉛直方向のシングルフォースの場合、(c)水平方向の断層の場合、(d)鉛直な横ずれ断層の場合。

5. まとめ

本研究では、地震波動伝播シミュレーションによって波形を計算し、特定の周波数が卓越して振動継続時間が長いという特徴的な火山性深部低周波地震の波形を再現できるような構造と力源について検討した。紡錘型の波形は、低速度領域内で複数のパルスが特定の時間間隔で作用し、共鳴が重なり合う特別な場合に出現することがわかった。多くの場合にはこのような条件が満たされないため多様な波形が出現すると考えられる。紡錘形の計算波形のスペクトルには倍音が現れ、観測スペクトルと調和的である。振動極性は、水平方向の力または断層を与えた場合は観測結果と調和的であるが、観測結果はより複雑で、共鳴体の形状や力源は仮定したものよりも複雑である可能性がある。今後は、本研究で仮定した低速度領域や力源が現実にはどのようなものであるかを検討することで、火山性深部低周波地震の発生メカニズムの解明に迫ることができると期待される。

謝辞：本研究には、東京大学地震研究所の EIC 計算システム、及び防災科学技術研究所高感度地震観測網で収録された地震波形データを利用しました。記して謝意を表します。

参考文献

- Hasegawa, A., J. Nakajima., N. Umino, and S. Miura, 2005, Deep structure of the northeastern Japan arc and its implications for crustal deformation and shallow seismic activity, *Tectonophysics*, 403, 59-75, doi: 10.1016/j.tecto.2005.03.018.
- 小菅正裕・春山太一, 2018, 長いコーダ波を持つ深部低周波地震, 日本国山学会 2018 年度秋季大会, A2-03, doi: 10.18940/vsj.2018.0_17.
- Kurihara, R., K. Obara, A. Takeo, and Y. Tanaka, 2019, Deep low-frequency earthquakes associated with the eruptions of Shinmoedake in Kirishima volcanoes, *Journal of Geophysical Research*, doi: 10.1029/2019JB018032.
- Maeda, T., S. Takemura, and T. Furumura, 2017, OpenSWPC: an open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media, *Earth Planets Space*, 69:102, doi: 10.1186/s40623-017-0687-2.
- Oikawa, G., N. Aso, and J. Nakajima, 2019, Focal mechanisms of deep low-frequency earthquakes beneath Zao volcano, northeast Japan, and relationship to the 2011 Tohoku Earthquake, *Geophysical Research Letters*, 46(13), 7361-7370, doi: 10.1029/2019GL082577.
- 上野 寛・畠山信一・明田川 保・舟崎 淳・浜田信生, 2002, 気象庁の震源決定方法の改善—浅部速度構造と重み関数の改良—, *騒震時報*, 65, 123–134.
- Ukawa, M. and M. Ohtake, 1987, A monochromatic earthquake suggesting deep-seated magmatic activity beneath the Izu-Ooshima Volcano, Japan, *Journal of Geophysical Research*, 92(B12), 12649-12663, doi:10.1029/JB092iB12p12649.
- Yukutake, Y., Y. Abe, and R. Doke, 2019, Deep low-frequency earthquakes beneath the Hakone volcano, central Japan, and their relation to volcanic activity, *Geophysical Research Letters*, 46(20), 11035-11043, doi: 10.1029/2019GL084357.